



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 44 008 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
B 23 K 26/38

②① Aktenzeichen: 101 44 008.1
②② Anmeldetag: 7. 9. 2001
④③ Offenlegungstag: 27. 3. 2003

DE 101 44 008 A 1

⑦① Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE; Hydraulik-Ring
GmbH, 09212 Limbach-Oberfrohna, DE

⑦④ Vertreter:
Zedlitz, P., Dipl.-Inf.Univ., Pat.-Anw., 80331
München

⑦② Erfinder:
Granse, Gerolf, 79689 Maulburg, DE; Lenk,
Andreas, Dr., 01728 Bannewitz, DE

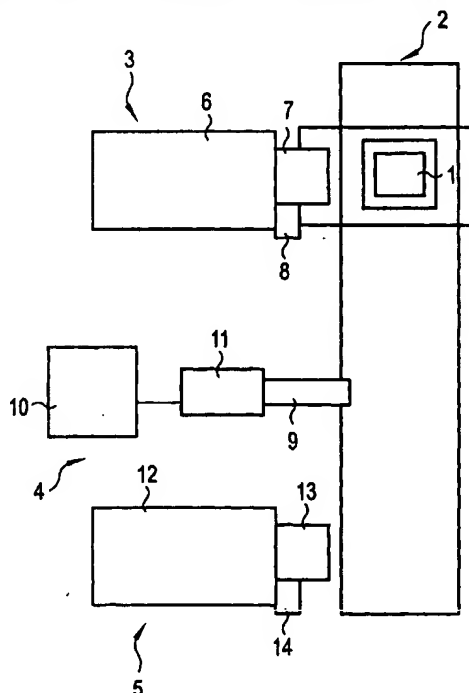
⑤⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE 199 05 571 C1
DE 197 45 280 A1
DE 195 49 052 A1
US 62 29 113 B1
US 48 22 974
EP 09 37 532 A1
WO 97 06 462 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum Erzeugen einer Bohrung in einem Werkstück mit Laserstrahlung

⑤⑦ Durch die Erfindung werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erzeugen von Bohrungen in einem Werkstück (1) mittels Laserstrahlung geschaffen. Dabei wird mit einem ersten Laser (6) in einem ersten Schritt eine Bohrung mit einem ersten Durchmesser gebohrt, der geringer ist als der endgültig zu erreichende Durchmesser. Dieser wird dann mit einem zweiten Laser (12) in einem zweiten Schritt oder in weiteren Schritten auf den zu erreichenden Durchmesser aufgeweitet.



DE 101 44 008 A 1

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Erzeugen einer Bohrung in einem Werkstück mittels eines Laserstrahls.

[0002] Das Einbringen von Präzisionsbohrungen, beispielsweise in Stahl oder in anderen metallischen Legierungen, mittels eines Lasers wird seit vielen Jahren industriell angewendet. Beispiele hierfür sind das Herstellen von Kühlungsbohrungen in Turbinenschaufeln oder das Bohren von Benzin- und Dieseleinspritzdüsen. Die Bohrungen haben einen Durchmesser in der Größenordnung von 50 bis 300 µm. Das Bohren von Einspritzdüsen oder Spindnuten ist jedoch durch extreme Anforderungen an die Geometrie der Bohrungen und deren Reproduzierbarkeit begrenzt, wenn gleichzeitig eine sehr kurze Prozesszeit angestrebt wird. Ebenso ist die Mikrobearbeitung eines schwer zerspannbaren Werkstücks zur Herstellung von Präzisionsschnitten oder zur Erzeugung von Mikrostrukturen in Gleit- oder Laufflächen beispielsweise aus der DE 197 45 280 A1 bekannt. Dort wird ein Laserstrahl vor dem Auftreffen auf ein Werkstück durch drei Module geführt. In dem ersten Modul wird der Laserstrahl um seine Strahlachse gedreht; mittels des zweiten Moduls wird der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Werkstück variiert; mittels des dritten Moduls wird der Neigungswinkel des Laserstrahls relativ zur Oberfläche des Werkstücks verändert.

[0003] Als Alternative steht zwar bei Durchmessern von 50 bis 150 µm zwar das Verfahren des Erodierens mit einer Elektrode, an die eine Hochspannung angelegt wird, alternativ zur Verfügung, jedoch stößt dieses Verfahren bei einem Aspektverhältnis (Verhältnis von Durchmesser der Bohrung zur Tiefe der Bohrung in dem Material) von 1 : 10 bis 1 : 20 an seine Grenzen.

[0004] Deswegen haben sich die Forschungsaktivitäten zum Laserbohren in letzter Zeit auf das Trepanier- oder Helixbohren sowie Abwandlungen dieser Bohrverfahren konzentriert. Unter Trepanier- oder Helixbohren versteht man das Durchdringen des Werkstücks, indem der Laserstrahl eine geschlossenen Kontur auf der Oberfläche abfährt, so dass das Material des Werkstücks innerhalb der Kontur herausgetrennt wird. Derartige Laser sind beispielsweise bekannt aus dem Vortrag "Effect of the wavelength on the high-aspect ratio microdrilling of steel with an all-solid-state laser" von Govorkov, S. V.; Slobodtchikov; Wiessner, A. O.; Basting, D.; Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000), Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol. 39 (IEEE Cat. No. 00CH37088). Derartige Laser sind gütegeschaltet und meist diodengepumpt. Sie verfügen über eine mittlere Leistung von nur wenigen Watt, so dass zur Erreichung einer hohen Präzision meist Prozesszeiten von einer oder mehreren Minuten erforderlich sind.

[0005] Andererseits ist es bekannt, dass unter bestimmten Bedingungen das Perkussionsbohren, d. h. Laserstrahl und Werkstück sind ortsfest zu einander angeordnet, mit einem modulierten Laserstrahl und mit Pulsdauern im Bereich von wenigen 0,1 ms Bohrungen mit Durchmessern im Bereich von 20 bis 800 µm erzeugt werden können, die allerdings nur eine geringe Präzision aufweisen. Diese geringe Präzision wird durch die den Bohrprozess bestimmenden Charakteristika des Laserstrahls, d. h. die Pulsdauer und die Pulsenergie des Laserstrahls, bestimmt, die jedoch eine hohe Abtragsrate ermöglichen.

[0006] Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zu schaffen, gemäß dem sich präzise Bohrungen erzeugen lassen.

[0007] Bei einem Verfahren der eingangs genannten Art wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass in einem ersten

Schritt eine Bohrung mit einem ersten Durchmesser gebohrt wird, der geringer ist als der endgültig zu erreichende Durchmesser, und dass in einem zweiten Schritt oder in weiteren Schritten die Bohrung auf den zu erreichenden Durchmesser aufgeweitet wird.

[0008] Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird der Laserbohrprozess in Teilprozesse zerlegt. Im ersten Schritt wird die Bohrung erzeugt, und in einem zweiten Schritt oder in weiteren Schritten wird der endgültig zu erreichende Durchmesser der Bohrung hergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Prozessdynamik der Teilschritte werden unterschiedliche Strahlquellen gewählt, deren Eigenschaften dem jeweiligen Teilschritt angepasst sind.

[0009] Bevorzugte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung sowie aus dem Ausführungsbeispiel.

[0010] Gemäß der Erfindung werden die für den jeweiligen Bearbeitungsschritt erforderlichen Eigenschaften des Laserstrahls optimiert. Der erste Teilprozess ist auf maximalen Materialabtrag, d. h. für das Schrubben, optimiert. Der zweite Teilprozess ist auf Erreichung einer maximalen Präzision und Beschädigungsfreiheit des Werkstücks beim Schlichten zur Erreichung der gewünschten Bohrung oder einer anderen Ausnehmung in dem Werkstück ausgerichtet.

[0011] Daher werden bevorzugt zwei unterschiedliche Laser zum Einsatz gebracht, deren Parameter, d. h. die Wellenlänge, die Pulsenergie, die Pulsdauer (der zeitliche Intensitätsverlauf), das Strahlprofil (der räumliche Intensitätsverlauf), die Pulsfrequenz und das Strahlparameterprodukt, für den jeweiligen Bearbeitungsschritt optimiert sind.

[0012] Der für den ersten Teilschritt eingesetzte Laser erzeugt beispielsweise eine Energie im Bereich zwischen 0,1 J bis zu mehreren Joule. Die Pulsdauer liegt bei 1 bis 2 Hz, sie erreicht höchstens 50 bis 100 Hz. Die Pulse haben eine Länge, die im Millisekundenbereich liegt.

[0013] Der für den zweiten Teilschritt verwendete Laser erzeugt Pulse mit einer Energie von weniger als 1 mJ bis höchstens 5 mJ. Die Pulsdauer liegt im Nanosekundenbereich oder ist noch kürzer. Der Laser ist bevorzugt ein frequenzverdoppelter oder ein gütegeschalteter Laser (Q-switched laser).

[0014] Somit ist es möglich, die Prozessdauer des Laserbohrens erheblich zu verkürzen, aber trotzdem eine Bohrung mit hoher Präzision herzustellen.

[0015] Erfindungsgemäß wird dafür Sorge getragen, dass nach Durchführung des ersten Teilprozesses der Laserstrahl beim zweiten Teilprozess wieder exakt auf die Bearbeitungsstelle des ersten Teilprozesses auftrifft. Hierzu dient ein Positioniersystem, mit dem das zu bearbeitende Werkstück in alle drei Raumrichtungen verfahren werden kann. Für die Bewegung des Werkstücks zwischen den Bearbeitungspositionen wird entweder ein 3-Achsen-CNC-System oder ein Steuersystem mit einem Personal Computer zur ein- oder mehrachsigen Bewegung des Werkstücks verwendet. Dabei vollzieht das Werkstück lineare oder auch zirkuläre Bewegungen. Auch Bearbeitungsstationen, bei denen das Werkstück dreidimensionale Bewegungen vollzieht, können zum Einsatz kommen. Auch die Bearbeitungsstationen selbst können linear oder zirkular bewegt werden, ebenso auch dreidimensional.

[0016] Bevorzugt wird zur Optimierung und Verkürzung der Prozessdauer der Durchmesser der Bohrung des ersten Teilprozesses nahe an dem in dem zweiten Schritt zu erreichenden Durchmesser gewählt. Bei besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Bohrung wird diese nach dem ersten Teilprozess vermessen, bevor der zweite Bearbeitungsschritt erfolgt. Hierzu wird beispielsweise eine Ka-

mera eingesetzt, die auf der Achse des Laserstrahls angeordnet ist. Die Bilder der Kamera werden durch digitale Bildverarbeitungstechniken bearbeitet. Aus den hieraus gewonnenen Informationen ist es möglich, Fehler in der Geometrie der Bohrungen zu korrigieren.

[0017] Ein hierfür einsatzfähiges System ist beispielsweise aus der EP 0 937 532 A1 bekannt. Der Laserstrahl wird sowohl über die Positionierung des Werkstücks als auch mittels einer Strahlnachführung in der gewünschten Weise auf das Werkstück ausgerichtet. Dazu werden beispielsweise bekannte Systeme zur Strahlstabilisierung eingesetzt, wie zum Beispiel Kippspiegel.

[0018] Zur Bewegung des Laserstrahls während des zweiten Bearbeitungsschritts wird ein Kippspiegelsystem (Galvoscaner) eingesetzt, wie es aus Laserbeschriftungssystemen bekannt ist. Das Kippspiegelsystem weist eine Planfeldoptik oder eine Einrichtung zur Strahldrehung auf, d. h. einen Strahlrotator. Das Kippspiegelsystem hat den Vorteil, dass mit ihm auch nicht-kreisförmige Bewegungen ausgeführt werden können.

[0019] Der Strahlrotator hat den Vorteil, dass er auch bei höheren Geschwindigkeiten eine Kreisbahn mit hoher Wiederholgenauigkeit und Rundheit abfährt. Darüber hinaus ist die Anzahl der Überfahrten des Laserstrahls über das Werkstück ebenso vorgebar wie die Nachführung des Brennpunkts des Laserstrahls, wobei die Lage des Brennpunkts schrittweise oder kontinuierlich geändert wird.

[0020] Neben zylindrischen Bohrungen lassen sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren auch konische oder teilweise konisch Bohrungen realisieren. Dabei wird die Geometrie der Bohrungen durch eine synchronisierte Taumelbewegung beeinflussen. Hierbei führt der Laserstrahl relativ zum zu bearbeitenden Werkstück eine Taumelbewegung aus und durchläuft dabei eine Kegelmantelfläche. Durch die Taumelbewegung wird das Längsprofil der Bohrung exakt definiert. Der Laserstrahl wird zusätzlich synchron mit der Taumelbewegung um die eigene Achse gedreht. Daher wirkt zu jedem Zeitpunkt die gleiche Laserstrahlstelle in azimuthaler Richtung auf das Werkstück ein. Ein unrunder Laserstrahlquerschnitt wird durch die Taumelbewegung egalisiert. Es entstehen extrem runde Bohrungsquerschnitte. Die Erzeugung eines taumelnden Laserstrahls durch eine drehenden Prismenanordnung ist aus der US 4 822 974 bekannt.

[0021] Eine andere Möglichkeit der Beeinflussung der Form der Bohrung besteht in der Nachführung des Brennpunkts des Laserstrahls.

[0022] Auch die Polarisation des Laserlichts hat einen Einfluss auf die Entstehung der Bohrungsgeometrie. Entweder wird der Einfluss der anfangs in dem Laserstrahl vorhandenen Polarisation dadurch unterdrückt, dass der Laserstrahl zirkular polarisiert wird, etwa durch eine $\lambda/4$ -Platte. Alternativ wird die Polarisation des Lichts gezielt ausgenutzt, indem beispielsweise der Laserstrahl während des zweiten Teilschritts so entlang der Wandung der Bohrung verfahren wird, dass die Polarisationsrichtung stets in radialer Richtung verläuft.

[0023] Wenn bei diesem Bearbeitungsschritt der Laserstrahl selbst bewegt wird, ergibt sich eine derartige Polarisationsrichtung nach einmaliger richtiger Justierung der Polarisationssebene des Strahls bezüglich der Wandung automatisch. Wenn das Werkstück bewegt wird, muss die Polarisationssebene des Laserstrahls synchron mitgeführt werden, was mittels einer sich drehenden $\lambda/2$ -Platte möglich ist. In jedem Fall ist es möglich, den Polarisationsvektor in einem definierten Winkel zur Bahntangente des Laserstrahls einzustellen.

[0024] Bevorzugt wird das erfindungsgemäße Verfahren

derart ausgeführt, dass der erste Schritt über einen kürzeren Zeitraum durchgeführt wird als der zweite oder ein weiterer Schritt.

[0025] In einer bevorzugten Variante werden der Laserstrahl und das Werkstück wenigstens während eines der Schritte zur Herstellung der Bohrung relativ zueinander bewegt, wobei entweder der Laserstrahl oder das Werkstück oder beide bewegt werden.

[0026] Ebenfalls bevorzugt wird der Bewegung des Laserstrahls gegenüber dem Werkstück eine synchrone taumelnde Bewegung überlagert.

[0027] In einer geeigneten Ausführungsform wird die Lage des Brennpunkts des Laserstrahls während des ersten oder des zweiten oder eines weiteren folgenden Schritts schrittweise oder kontinuierlich verändert.

[0028] Die Erfindung bezieht sich ebenfalls auf eine Vorrichtung zum Erzeugen einer Bohrung in einem Werkstück mittels Laserstrahlung. Diese ist erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass sie einen ersten und einen zweiten Laser umfasst, die sich mindestens durch einen Parameter unterscheiden.

[0029] Bevorzugt sind jedem der Laser jeweils eine eigene Bearbeitungsoptik und ein eigenes Handlingsystem zugeordnet. Das Handlingsystem ist beispielsweise ein Kreuztisch mit Verschiebungselementen, insbesondere eine CNC-Einheit zum Verschieben des Werkstücks.

[0030] Bei den für das Handlingsystem eingesetzten Komponenten wird bevorzugt eine Wiederholgenauigkeit bei der Bearbeitung des Werkstücks von mehr als 2 μm , insbesondere mehr als 1 μm , angestrebt.

[0031] In einer vorteilhaften Weiterbildung hat die Vorrichtung ein Messmikroskop einschließlich einer Bildauswertungseinheit, um das Bearbeitungsergebnis aus dem ersten Teilprozess exakt zu lokalisieren.

[0032] Vorteilhaft ist eine Überwachungseinheit zur Überwachung der Strahllage des Laserstrahls.

[0033] In einer vorteilhaften Ausführung der Vorrichtung ist eine einem Objektiv der Bearbeitungsoptik nachgeordnete Scaneinrichtung oder eine Planfeldoptik oder ein Strahlrotator vorgesehen.

[0034] Vorteilhaft ist es, wenn eine rotierende Planplatte oder eine wenigstens zwei Spiegel aufweisende Spiegelanordnung zur Erzeugung einer Taumelbewegung vorhanden ist. Alternativ umfasst die Spiegelanordnung drei oder vier Spiegel.

[0035] Nachstehend wird die Erfindung in einem Ausführungsbeispiel näher erläutert. Die einzige Figur zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0036] Ein Werkstück 1 aus Stahl mit einer Dicke von 1 mm wird über eine 3-Achsen-CNC-Einheit 2 transportiert. Die Einheit 2 weist drei Stationen 4, 5 und 6 auf. Die Station 3 umfasst einen Nd:YAG-Laser 6 mit einer Bearbeitungsoptik 7, die beispielsweise eine Brennweite von 100 mm hat. Der Laser 6 emittiert einen Pulszug mit Pulslängen von 0,3 ms und einer Gesamtenergie von 1 J. Nach 0,5 s wird ein zweiter Pulszug emittiert, wobei die Lage des Brennpunkts um 1 mm entsprechend der Dicke des Werkstücks 1 auf 101 mm verschoben wird. Auf diese Weise wird eine Bohrung mit einem Durchmesser von 250 μm erzeugt. Die Abweichung von der Zylinderform beträgt hierbei $\pm 5\%$. Mit einer Überwachungseinheit 8 wird die Position des Laserstrahls bezüglich des Werkstücks überwacht. Falls diese von der Soll-Position abweicht, wird die Einheit 2 mit dem Werkstück 1 entsprechend nachgeführt.

[0037] Danach positioniert die Einheit 2 das Werkstück 1 vor die Station 4, an der die Position der Bohrung genau bestimmt wird. Hierzu dient ein Mikroskop 9 mit einer an das

Mikroskop 9 angeschlossenen Bildauswertungseinheit 10. Das Mikroskop 9 vergrößert ein von einer CCD-Kamera 11 erzeugtes Bild der Bohrung um das Zwanzig- bis Fünfzigfache. Falls sich dabei zeigt, dass der Laserstrahl nicht die Soll-Position einnimmt, wird die Einheit 2 bezüglich der Station 2 nachjustiert. Bei unzulässigen Abweichungen wird die Strahlage des Lasers 6 durch die Überwachungseinheit 8 kontrolliert.

[0038] Unter Berücksichtigung der erfassten Position des Werkstücks 1 wird dieses anschließend zu der Station 5 bewegt. Dort ist ein gütegeschalteter und frequenzverdoppelter Festkörperlaser 12 vorhanden. Ihm ist eine Bearbeitungsoptik 13 zugeordnet. Auf einer durch eine Überwachungseinheit 14 erfassten Strahlage wird das Werkstück 1 ausgerichtet.

[0039] Die Bearbeitungsoptik 13 umfasst eine rotierende Keilplatte zur Erzeugung einer Trepanierbewegung, d. h. einer Kreisbewegung, und eine korrigierte Sammellinse mit einer Brennweite von 100 mm. Die Bearbeitungsoptik 13 führt den Laserstrahl auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt der Bohrung herum. Auf diese Weise erhält die Bohrung in dem Werkstück 1 ihre endgültige Form; dabei wird nach einer Prozessdauer von weniger als 30 s eine Zylinderformabweichung der Bohrung von $\pm 1\%$ erzielt.

[0040] Die Bearbeitungsoptiken 7, 13 umfassen entweder eine hinter einer Sammellinse angeordnete Scaneinheit (post-objective Scanning), die gegen einander bewegliche Spiegel aufweist; oder es ist eine f- θ oder eine telezentrische Planfeldoptik vorgesehen. Alternativ lässt sich ein Strahlrotator einsetzen, der entweder eine Anordnung von zwei, drei oder vier Spiegeln aufweist, oder aus einer rotierenden Keilplattenanordnung besteht.

[0041] Durch die Erfindung werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erzeugen von Bohrungen in einem Werkstück 1 mittels Laserstrahlung geschaffen. Dabei wird mit einem ersten Laser 6 in einem ersten Schritt eine Bohrung mit einem ersten Durchmesser gebohrt, der geringer ist als der endgültig zu erreichende Durchmesser. Dieser wird dann mit einem zweiten Laser 12 in einem zweiten Schritt oder in weiteren Schritten auf den zu erreichenden Durchmesser aufgeweitet.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen einer Bohrung in einem Werkstück (1) mittels eines Laserstrahls, dadurch gekennzeichnet, dass in einem ersten Schritt eine Bohrung mit einem ersten Durchmesser gebohrt wird, der geringer ist als der endgültig zu erreichende Durchmesser, und dass in einem zweiten Schritt oder in weiteren Schritten die Bohrung auf den zu erreichenden Durchmesser aufgeweitet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Bohrung in dem ersten Schritt durch Schrubben und in dem zweiten Schritt oder in den weiteren Schritten durch Schlichten und/oder Polieren gebildet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Schritt über einen kürzeren Zeitraum durchgeführt wird als der zweite oder ein weiterer Schritt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl und das Werkstück (1) wenigstens während eines der Schritte zur Herstellung der Bohrung relativ zueinander bewegt werden, wobei entweder der Laserstrahl oder das Werkstück (1) oder beide bewegt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet,

net, dass der Bewegung des Laserstrahls gegenüber dem Werkstück (1) eine synchrone taumelnde Bewegung überlagert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Lage des Brennpunkts des Laserstrahls während des ersten oder des zweiten oder eines weiteren folgenden Schritts schrittweise oder kontinuierlich verändert wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Bewegung des Laserstrahls beim zweiten oder einem weiteren Schritt eine Drehung der Polarisationssebene überlagert wird.

8. Vorrichtung zum Erzeugen einer Bohrung in einem Werkstück (1) mittels Laserstrahlung, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung einen ersten (6) und einen zweiten Laser (12) umfasst, die sich mindestens durch einen Parameter unterscheiden.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass sich der erste (6) und der zweite Laser (12) durch die Wellenlänge der von ihnen emittierten Strahlung, durch deren Pulsdauer, deren Strahlprofil, die Pulsenergie, die Pulsfrequenz, und das Strahlparameterprodukt unterscheiden.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass jedem der Laser (6, 12) jeweils eine Bearbeitungsoptik (7, 13) und eine Einheit (2) zum Bewegen des Werkstücks (1) zugeordnet sind.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Einheit (2) Wiederholgenauigkeit von mehr als 2 μm , insbesondere mehr als 1 μm , aufweist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass sie ein Mikroskop (9) einschließlich einer Bildauswertungseinheit (10) umfasst.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass jedem Laser (6, 12) eine Überwachungseinheit (8, 14) zur Überwachung der Strahlage des Laserstrahls zugeordnet ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine einem Objektiv der Bearbeitungsoptik (7, 13) nachgeordnete Scaneinheit oder eine Planfeldoptik oder einen Strahlrotator umfasst.

15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine rotierende Planplatte oder eine wenigstens zwei Spiegel aufweisende Spiegelanordnung zur Erzeugung einer Taumelbewegung vorhanden ist.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass zur Drehung der Polarisationssebene des Laserstrahls eine sich drehende $\lambda/2$ -Platte oder zur Erzeugung zirkular polarisierten Lichts eine $\lambda/4$ -Platte vorhanden ist.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

